

## ELEKTROOPTIČKA ČELIJA ZA MERENJE NAIZMENIČNOG NAPONA NA BAZI POCKELS-OVOG EFEKTA

Stevan Stanković, Jovan Radunović, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

*Nagrađeni rad mladog istraživača – komisija ML*

**Sadržaj** – U radu je opisana metoda za određivanje naizmeničnog napona na bazi Pockels-ovog efekta. Prikazana je eksperimentalna postavka sa laserom i spoljašnjim elektrodama i predloženi su problemi koji se javljaju pri ovoj mernoj konfiguraciji. Opisana je elektrooptička ćelija, dizajnirana za merenja sa raspoloživim kristalom  $\text{LiNbO}_3$  i svetlosnom diodom, kao optičkim izvorom. Prikazani su eksperimentalni rezultati dobijeni korišćenjem ove ćelije, sa i bez upotrebe blende.

### 1. UVOD

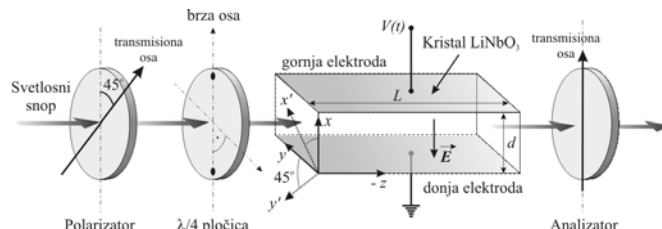
Potreba za merenjem napona i električnih polja dovela je do razvoja mernih sistema zasnovanih na različitim fizičkim principima i optimizovanim za konkretne primene. Jedna od fizičkih pojava koja omogućuje merenje električnog polja ili napona je linearni elektro-optički efekat, odnosno Pockels-ov efekat. Ovaj efekat se javlja kod kristala koji ne poseduju centar simetrije i ispoljava se u promeni tenzora dielektrične impermeabilnosti kristala (kao i indeksa prelamanja) koja je linearno srazmerna komponentama primenjenog električnog polja u kristalu. Prednosti koje pruža ovaj efekat, dolaze naročito do izražaja pri merenju visokih naizmeničnih napona u elektrodistributivnim mrežama i postrojenjima, gde postojeći klasični sistemi na bazi naponskih transformatora zahtevaju veliki prostor, skupu montažu i održavanje. Pored manjih dimenzija i mase, optički senzori napona nude širi prostorni opseg, nižu cenu, kao i električnu izolaciju, što je značajno kako u pogledu bezbednijeg rada operatera, tako i sa aspekta zaštite mernog signala od elektromagnetskih smetnji. U zadnjih nekoliko godina razvijeno je nekoliko optičkih senzora napona, prvenstveno za primene u visokonaponskim postrojenjima [1], [2], [3].

Cilj ovog rada je bio da se oceni mogućnost realizacije elektrooptičkog senzora naizmeničnog napona za industrijske učestanosti, kao i da se sagledaju glavni problemi koji se javljaju u dizajniranju ovakvih senzora.

### 2. OSNOVI MERNE METODE

Za elektrooptički senzor napona je izabrana merna konfiguracija zasnovana na tzv. transversalnoj elektro-optičkoj modulaciji, kada je primenjeno električno polje normalno na pravac prostiranja svetlosti u kristalu. Ovakva konfiguracija, prikazana na Slici 1, često se koristi za elektrooptičke senzore [4], a njene pogodnosti su u tome što omogućuje da se elektrode sa primenjenim naponom postave na bočne strane elektrooptičkog kristala, tako da prednja i zadnja strana kristala ostanu optički transparentne i eventualno obložene antirefleksivnim slojevima za odgovarajuću talasnu dužinu upadne svetlosti. Dodatna prednost je i u tome što se svetlosni snop propušta duž optičke ose kristala, čime se eliminiše temperaturna

zavisnost stanja njegove polarizacije usled dvojnog prelamanja.



Slika 1. Transverzalna elektrooptička modulacija

Upadni svetlosni snop prolazi kroz polarizator, a zatim kroz  $\lambda/4$  pločicu, pri čemu je transmisiona osa polarizatora postavljena pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na brzu osu talasne pločice, čime se linearno polarizovana svetlost pretvara u cirkularno polarizovanu svetlost koja pada na kristal. U merenjima je korišćen kristal litijum-niobata ( $\text{LiNbO}_3$ ), dimenzija  $6 \times 6 \times 30$  mm, sa metaliziranim stranama ( $\text{Au} + \text{Cr}$ ) normalnim na  $x$ -osu kristala i širokopojasnim antirefleksivnim slojevima ( $500\text{-}1000$  nm) nanetim na stranama koje su normalne na  $z$ -osu kristala. Kristal je postavljen tako da se svetlost prostire duž  $z$ -ose (koja je ujedno i optička osa kristala), a električno polje se primenjuje duž  $x$ -ose. U kristalu, usled primenjenog električnog polja, dolazi do rotacije glavnih osa kristala  $x$  i  $y$  za  $45^\circ$  oko  $z$ -ose, tako da se formiraju nove glavne ose  $x'$  i  $y'$ . Ujedno, dolazi i do faznog pomeraja između  $x'$  i  $y'$  komponente vektora električnog polja svetlosnog talasa, čime se kružno polarizovana svetlost pretvara u eliptično polarizovanu svetlost. Po izlasku iz kristala, svetlost se propušta kroz analizador čija je transmisiona osa postavljena pod uglom od  $0^\circ$  prema brzoj osi talasne pločice. Analizom opisanog sistema, može se dobiti izraz za intenzitet svetlosti  $I_t$  propuštene kroz analizador [5]:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{2} [1 + \sin(aV(t))], \quad (1)$$

gde je  $I_0$  – intenzitet upadne svetlosti,  $V(t)$  je vremenski promenljivi napon primenjen na elektrode, dok je koeficijent  $a$  dat izrazom:

$$a = \frac{4\pi L n_o^3 r_{22}}{\lambda_0 d}, \quad (2)$$

gde je  $L$  – dužina kristala,  $d$  – debljina kristala (duž  $x$ -ose),  $n_o$  – indeks prelamanja za redovan zrak,  $\lambda_0$  – talasna dužina svetlosti, a  $r_{22}$  odgovarajući elektrooptički koeficijent. Za male vrednosti napona  $V(t)$ , tj. kada je  $aV(t) \ll 1$ , jednačina (1) dobija sledeći oblik:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{2} [1 + aV(t)]. \quad (3)$$

Ukoliko se primeni naizmjeničan napon  $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$ , iradijansa transmitovanog snopa je amplitudski modulirana ovim naponom:

$$I_t = \frac{I_0}{2} (1 + a V_0 \sin \omega t). \quad (4)$$

Količnik naizmjenične i jednosmerne komponente ovog signala  $I_{LAC}$  i  $I_{DC}$ , je direktno srazmeran primenjenom naponu:

$$\frac{I_{LAC}}{I_{DC}} = a V_0 \sin(\omega t). \quad (5)$$

Prema ovome, potrebno je detektovati transmitovani svetlosni signal, izdvojiti naizmjeničnu i jednosmernu komponentu signala i na osnovu njihovog količnika dobiti signal koji je direktno srazmeran primenjenom naponu. U slučaju kada primenjeni napon nije dovoljno mali, tj. kada se ne može iskoristiti aproksimacija  $aV(t) \ll 1$ , imamo da je:

$$I_t = \frac{I_0}{2} (1 + \sin(aV_0 \sin \omega t)). \quad (6)$$

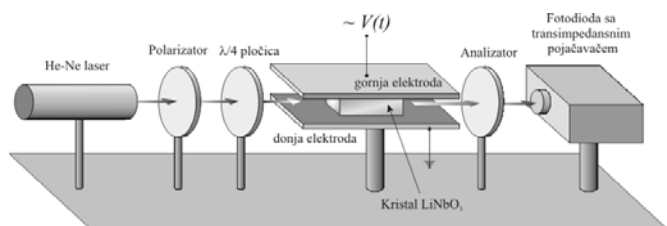
Vidimo da se u ovom slučaju jednosmerna komponenta signala ne menja, ali se u spektru signala javljaju neparni harmonici, zbog prisustva sinusne funkcije. Kako je veličina harmonika direktno srazmerna amplitudi napona  $V_0$ , to se i u ovom slučaju, izdvajanjem naizmjenične komponente i njenim deljenjem sa srednjom vrednosti signala, dobija veličina koja je srazmerna amplitudi primenjenog napona. Količnik naizmjenične i jednosmerne komponente (srednje vrednosti) transmitovanog signala  $I_{LAC}$  i  $I_{DC}$ , u ovom slučaju iznosi:

$$\frac{I_{LAC}}{I_{DC}} = \sin(aV_0 \sin(\omega t)). \quad (7)$$

Shodno ovome, osnovna ideja merenja je bila da se detektuje intenzitet transmitovanog svetlosnog snopa, izdvoje naizmjenična i jednosmerna komponenta ovog signala i snimi funkcionalna zavisnost njihovog količnika od efektivne vrednosti primenjenog naizmjeničnog napona.

### 3. PRELIMINARNA MERENJA SA LASEROM I PROBLEMI VEZANI ZA OPISANU POSTAVKU

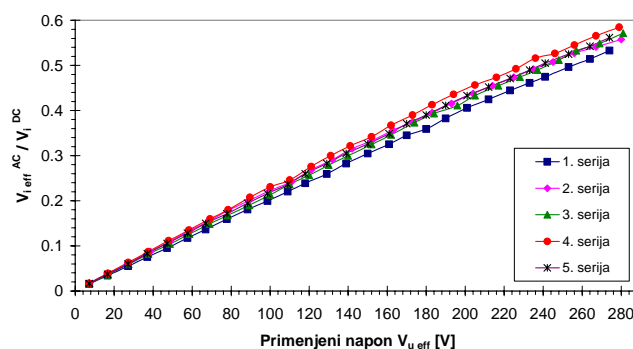
Prvobitna eksperimentalna postavka, realizovana sa He-Ne laserom ( $\lambda=632,8$  nm) i prikazana na Slici 2, predstavljala je jednostavnu implementaciju merne šeme date na Slici 1. Kristal je postavljen između dve ravne, metalne elektrode, montirane na mehanički nosač načinjen od izolatora. Površine elektroda su bile u mehaničkom kontaktu sa metaliziranim površinama kristala tako da se primenom napona na elektrode uspostavljalo homogeno električno polje u kristalu. Kao detektor, korišćena je fotodioda sa transimpedansnim pojačavačem koji na izlazu daje naponski signal srazmeran intenzitetu upadne svetlosti.



Slika 2. Eksperimentalna postavka sa He-Ne laserom

Na elektrode je dovođen naizmjenični napon iz autotransformatora priključenog na mrežni napon. Maksimalna efektivna vrednost napona na izlazu autotransformatora je bila oko 280V, što približno odgovara amplitudi naizmjeničnog napona od oko 400V. Kako je polutalasn napon datog kristala LiNbO<sub>3</sub> bio oko 800V, to je raspoloživi opseg naizmjeničnog napona bio sasvim dovoljan da se snimi deo prenosne karakteristike koji je od interesa.

Izlazni naponski signal sa fotodetektora, kao i naponski signal sa autotransformatora, praćeni su pomoću digitalnog osciloskopa dok su efektivne vrednosti ova dva napona merene voltmetrima. Snimana je zavisnost količnika efektivne i jednosmerne vrednosti izlaznog napona u funkciji od efektivne vrednosti naizmjeničnog napona na elektrodama. Merenja su vršena u laboratoriji, tokom pet dana, kako bi se proverila ponovljivost rezultata. Dobijene prenosne karakteristike su prikazane na Slici 3.



Slika 3. Prenosne karakteristike u slučaju postavke sa He-Ne laserom na optičkoj klupi

Pored međusobne sličnosti, uočavaju se odstupanja između prenosnih karakteristika koja su posebno izražena pri efektivnim vrednostima primenjenog napona većim od 200V. S druge strane, prema jednačini (7), očekivalo bi se da snimljene karakteristike imaju oblik sinusne funkcije, dok dobijene krive pre ukazuju na linearnu zavisnost, ne pokazujući tendenciju zasićenja pri većim naponima pobude. To navodi na pomisao da je između gornje elektrode i gornje metalizirane površine kristala postojao zazor, odnosno vazdušni procep. Postojanje ovakvog procepa bi dovelo do pada napona na njemu, a time i smanjenja električnog polja u kristalu. To bi se odrazilo kao povećanje polutalnog napona kristala, pa bi za dati opseg pobudnih napona, prenosna karakteristika bila linearnija. Takođe, eventualne oscilacije u veličini ovog procepa bi se osetno odrazilo na meri signal u vidu smanjenja ili povećanja nagiba prenosne karakteristike.

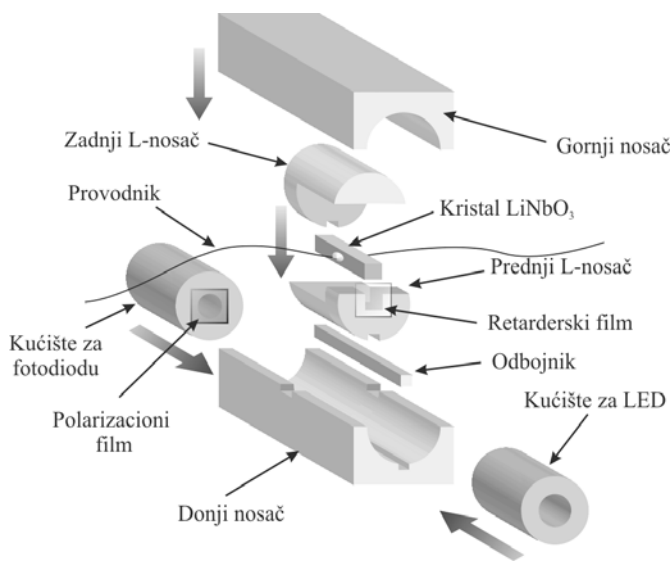
Ovim se može objasniti relativno loša ponovljivost dobijenih karakteristika, mada se ne može isključiti i eventualni uticaj drugih činilaca. U opisanoj postavci, laserski snop prelazi relativno dug put u slobodnom prostoru (oko 80 cm), pa i najmanji pomeraj bilo koje od komponenti može da dovede do osetne promene u karakteristici snopa (kako sa aspekta polarizacije, tako i sa aspekta pravca prostiranja snopa), što bi se odrazilo na intenzitet detektovanog signala.

Postavka eksperimenta na optičkoj klupi, koja je ionako bila samo preliminarno merenje, pokazala je da se mora strogo povesti računa o kvalitetu kontakta između spoljašnjih elektroda i metaliziranih površina. Takođe, uočena je potreba

da se osmisli kompaktnija merna konfiguracija, u kojoj bi sve optičke komponente bile montirane u okviru jednog mehaničkog elementa.

#### 4. ELEKTROOPTIČKA ČELIJA

Kao rešenje, izabrana je realizacija posebno osmišljene elektrooptičke ćelije u kojoj bi se montirali izvor svetlosti, polarizator,  $\lambda/4$  pločica, kristal  $\text{LiNbO}_3$ , analizator i fotodetektor, a koja bi ujedno i omogućila priključivanje naizmeničnog napona na kristal. Za izvor svetlosti izabrana je crvena LED dioda ( $\lambda=626$  nm), malog ugla emitovanja svetlosti od  $2\theta_{1/2} = 6^\circ$ . Prednost je data LED-u u odnosu na lasersku diodu, zbog jednostavnijeg pobuđivanja, veće robusnosti u radu, kao i činjenice da će u budućem razvoju senzorske glave svetlost biti dovođena u kristal preko optičkog vlakna. U tom slučaju teško je ostvariti usmerenost kakvu poseduje laserski snop, pa je ideja bila da se vidi kakvi će se rezultati dobiti u slučaju primene svetlosnog snopa sa osetnom divergencijom. Naime, divergencija snopa degradira stanje polarizacije propuštene svetlosti (ne dobija se cirkularna, već eliptična polarizacija), što dovodi do manje osetljivosti i smanjenja dubine modulacije intenziteta propuštene svetlosti. Za fotodetektor je izabrana fotodioda sa integrisanim transimpedansnim pojačavačem. Njeno napajanje se vrši pomoću spoljašnjeg naponskog izvora, a na izlazu se dobija naponski signal.

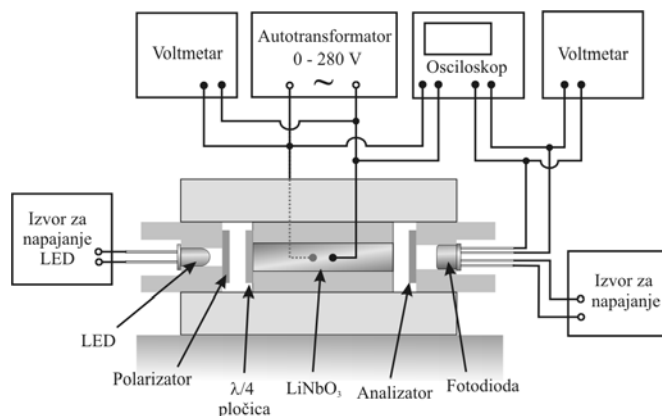


Slika 4. Sastavni delovi elektrooptičke ćelije

Kako je kristal već posedovao metalizirane površine, da bi se izbegli bilo kakvi mehanički kontakti, u čiju se pouzdanost može sumnjati, odlučeno je da se na ove površine bondiraju žice, kako bi se naizmenični pobudni napon dovođio preko njih. Pored ovog, bilo je potrebno obezbediti mogućnost rotacije transmisiona ose polarizatora i analizatora, kako bi se mogli podesiti njihovi optimalni položaji.

Detaljan prikaz dizajnirane elektrooptičke ćelije, dat je na Slici 4. Svi delovi ćelije su izrađeni od PVC-a, koji je jednostavan za obradu, a predstavlja dobar električni izolator. Načelno, ćelija se sastoji iz tri dela: centralnog dela i dva cilindrična kućišta – jednog za LED i drugog za fotodiodu. Centralni deo se sastoji od gornjeg i donjeg nosača, odbojnika i dva L-nosača kristala. Donji i gornji nosač imaju

polucilindrično udubljenje, tako da kada se poklope jedan na drugi, obrazuju centralnu cilindričnu cev u kojoj se nalaze nosači kristala, kao i sam kristal. Donji nosač poseduje žljeb u koji se ubacuje odbojnik, koji ujedno služi i kao šina na koju se montiraju L-nosači kristala. Kristal se postavlja na L-nosače koji se zatim montiraju na odbojnik u žljebu donjeg nosača. Na prednjem L-nosaču, montiran je film koji ima ulogu optičkog retardera, odnosno  $\lambda/4$ -pločice. Posebni otvori na donjem nosaču, omogućuju da se žice, bondirane za metalizirane površine kristala, izvuku izvan elektrooptičke ćelije i priključe na naizmenični napon.



Slika 5. Eksperimentalna postavka sa elektrooptičkom ćelijom

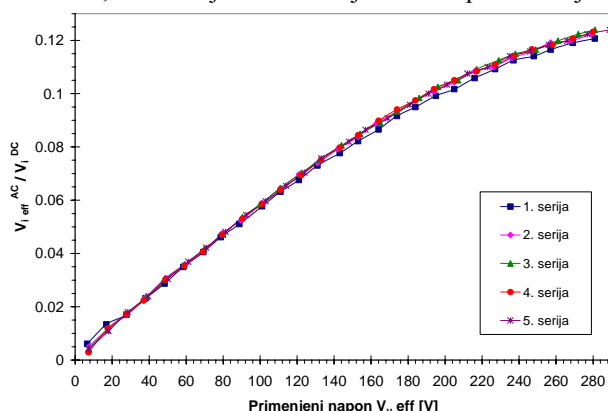
Na krajeve cilindrične cevi centralnog dela se ubacuju cilindrična kućišta za LED i fotodiodu. Na oba kućišta, na krajevima koji su okrenuti ka kristalu, zalepljeni su polarizacioni filmovi. Polarizacioni film na kućištu LED ima ulogu polarizatora, dok onaj na kućištu fotodiode ima ulogu analizatora. Kada se kućišta ubace u centralni nosač, kružni profil omogućuje njihovu rotaciju oko uzdužne ose, čime se podešavaju položaji transmisionih osa polarizatora i analizatora. Zavrtnjima, montiranim sa gornje strane centralnog nosača, cilindrična kućišta se mogu fiksirati u željenom položaju. Odbojnik sprečava da cilindrična kućišta dodirnu i oštete L-nosače kristala.

#### 5. REZULTATI MERENJA SA ELEKTROOPTIČKOM ČELIJOM

Nakon izrade elektrooptičke ćelije i postavljanja kristala u nju, izvršena je serija merenja. Slično kao i u postavci sa laserom, na metalizirane elektrode kristala je, preko izvedenih žica, dovođen naizmenični napon sa autotransformatora. Signalni napon sa fotodiode i pobudni naizmenični napon su praćeni na osciloskopu, a merenje efektivnih vrednosti naizmeničnih komponenti i jednosmerne komponente signalnog napona, vršeno je pomoću voltmetara. Šematski prikaz merne postavke je prikazan na Slici 5. Prenosne karakteristike, snimljene sa ovakvom postavkom, tokom pet dana, prikazane su na Slici 6.

U poređenju sa prethodno dobijenim karakteristikama, prikazanim na Slici 3, primećuje se znatno bolja ponovljivost merenja, kao i to da dobijene karakteristike zaista podsećaju na teorijski očekivanu funkcionalnu zavisnost datu izrazom (7). Ipak, uočava se i znatno manja dubina modulacije nego u prethodnom merenju sa laserom, odnosno znatno je manji količnik efektivne i srednje vrednosti izlaznog napona. Osnovni razlog ovome je osetna divergencija svetlosnog

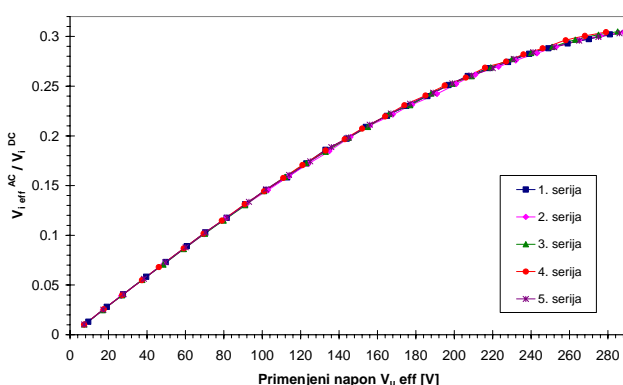
snopa iz LED-a, kao i lošiji stepen polarizacije svetlosti propuštene kroz polarizator u poređenju sa laserskom svetlošću He-Ne lasera. Kako bi se korigovao ovaj nedostatak, izvršena je modifikacija elektrooptičke ćelije.



Slika 6. Prenosne karakteristike u slučaju postavke sa elektrooptičkom ćelijom

## 6. MODIFIKACIJA ELEKTROOPTIČKE ĆELIJE I REZULTATI MERENJA

Da bi se smanjila divergencija svetlosnog snopa koji prolazi kroz kristal  $\text{LiNbO}_3$ , u elektrooptičku ćeliju je ubačena blenda sa kružnim otvorom prečnika 1 mm. Blenda je postavljena je u cilindričnu cev centralnog dela ćelije, između polarizatora na cilindričnom kućištu LED-a i  $\lambda/4$  pločice, odnosno optičkog retardera na prednjem L-nosaču kristala. Kako je ova kružna apertura na rastojanju od 15 mm od izvora svetlosti, kroz ovaj otvor će proći samo svetlosni zraci sa uglom divergencije manjim od oko  $4^\circ$ . Time je smanjena divergencija zraka koji se propuštaju kroz elektrooptički kristal, ali je i smanjen intenzitet propuštene svetlosti. Kako je i pre ovoga intenzitet propuštene svetlosti bio relativno veliki (jednosmerna vrednost izlaznog signala je bila oko 1,2 V), smatralo se da ovo smanjenje neće znatno degradirati kvalitet signala.



Slika 7. Prenosne karakteristike sa elektrooptičkom ćelijom i ubačenom blendom

Tokom pet dana su vršene serije merenja sa istom postavkom kao i u prethodnom slučaju, a dobijene prenosne karakteristike su prikazane na Slici 7. U poređenju sa rezultatima merenja bez blende, prikazanim na Slici 6, primećuje se još bolja ponovljivost i veća dubina modulacije koja je sa maksimalne vrednosti od 0,17 u slučaju merenja bez blende, povećana na oko 0,40. Doduše, smanjenje

ukupnog intenziteta propuštene svetlosti je povećalo odnos signal-šum, što se, pri praćenju vremenskog oblika signalnog napona na osciloskopu, najviše uočava za niže vrednosti primenjenog naizmjeničnog napona. Ipak, kao što se vidi sa Slike 7, efektivna vrednost naizmjenične komponente signala nije pokazivala veća odstupanja.

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je opisan eksperimentalni metod za merenje naizmjeničnog napona na bazi Pockels-ovog elektrooptičkog efekta. Prikazana je eksperimentalna postavka sa laserom i spoljašnjim metalnim elektrodama i predloženi su problemi koji se javljaju pri ovakvoj metodi. Opisana je elektrooptička ćelija, posebno dizajnirana za merenja sa raspoloživim kristalom i svetlosnom diodom, kao optičkim izvorom. Prikazani su eksperimentalni rezultati dobijeni korišćenjem ove ćelije i uočeni su nedostaci vezani za dubinu modulacije, koji nastaju prvenstveno zbog velike divergencije svetlosnog snopa. Da bi se ovo rešilo, dizajnirana je posebna blenda, koja je postavljena u elektrooptičku ćeliju. Izvršena je serija merenja sa ovako modifikovanom ćelijom i dobijeni rezultati su upoređeni sa prethodno dobijenim prenosnim karakteristikama. Uočena su znatna poboljšanja, kako sa aspekta ponovljivosti, tako i dubine modulacije izlaznog naponskog signala.

## LITERATURA

- [1] N. A. F. Jaeger, F. Rahmatian, "Integrated Optics Pockels Cell High-Voltage Sensor", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 1, pp. 127-134, January 1995.
- [2] C. Li, X. Cui, T. Yoshino, "Measurement of AC Electric Power Based on Dual Transverse Pockels Effect", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 5, pp. 1375-1380, October 2001.
- [3] F. Rahmatian, P.P. Chavez, N.A.F. Jaeger, "230 kV Optical Voltage Transducers Using Multiple Electric Field Sensors," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 417-422, April 2002.
- [4] M. Passard, C. Barthod, M. Fortin, C. Galez, J. Bouillot, "Design and Optimization of a Low-Frequency Electric Field Sensor Using Pockels Effect", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 5, pp. 1053-1057, October 2001.
- [5] J.Radunović, S.Petričević, P.Mihailović, G.Mašanović, S.Stanković, M.Barjaktarović, "Optoelektronski merni sistemi u energetici", *Zbornik XLVII Konf. ETRAN-a*, vol. 3, pp. 363-368, Herceg Novi, 2003.

**Abstract** – A method for AC voltage measurement based on Pockels effect is elaborated in this paper. An experimental setup including laser and the external electrodes is presented, along with the problems associated with such configuration. Afterwards, an electro-optic cell, specially designed for measurements with the available  $\text{LiNbO}_3$  crystal, and using LED as a light source, is described. Eventually, the experimental results obtained using this electro-optic cell, with and without an iris, are presented.

## AN ELECTRO-OPTIC CELL FOR AC VOLTAGE MEASUREMENT BASED ON POCKELS EFFECT

Stevan Stanković, Jovan Radunović